

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.04.012

基于 STM32 的直流电机模糊 PID 调速系统研究

黄 平, 王 英, 江先志*

(浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:针对普通 PID 控制难以满足现代工业对直流电机控制高速度、高精度要求的问题,对直流电机及其控制系统进行了研究,设计了一种以 STM32 芯片为核心的自适应模糊 PID 控制直流电机调速系统。此调速系统通过采用模糊自适应 PID 控制算法改变 PWM 波占空比来实现系统灵活调速。在实验环境中,分别采用普通 PID 控制器和参数自适应模糊 PID 控制器来实现直流电机的调速系统,并通过主控芯片实时发送电机速度到上位机软件,绘制响应曲线。研究结果表明,模糊 PID 控制器在电机运行过程中,系统动态调节直流电机的 PID 参数,有效解决了传统 PID 整定困难的问题,并显著提高了电机的响应速度和控制精度。

关键词: 直流电机;模糊控制 PID;调速系统

中图分类号: TH39; TM33

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)04-0380-06

DC motor fuzzy-PID control system based on STM32

HUANG Ping, WANG Ying, JIANG Xian-zhi

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problem of that the high precision and high speed requirements in modern industry couldn't be satisfied by classical PID controller, a DC motor control optimize solution was proposed in this paper. This solution was based on the fuzzy-PID algorithm which made use of the STM32 chip to design the DC motor speed control system. By using fuzzy-PID control algorithm, the duty ration of the PWM was changed to control the speed. During experiments, the speed which was controlled individually by classical PID and fuzzy-PID controller was sent to the computer software to draw response curve. The difficulty of parameter adjustment in classical PID controller was solved effectively by fuzzy-PID which could change the PID parameters by the system inputs during the processing. The results indicate that the application of fuzzy-PID controller can improve the response speed and precision of the DC motor significantly.

Key words: DC motor; fuzzy-PID; speed regulate

0 引 言

直流电机由于其良好的启动和调速性能,在工业生产中应用较为广泛。传统 PID 控制方式能满足一般场合对直流电机调速精度的要求。但是直流电机调速系统是一个多变量、强耦合、非线性、时变的复杂系统,随着工业发展,现代工业对电机控制提出更高精

度、高速度的要求,传统 PID 控制方式显然已经不能满足要求^[1-2]。

近年来,模糊逻辑,专家系统,神经网络等先进算法相继被提出,它们为直流电机的高性能控制提供了基础条件^[3]。模糊控制是建立在人工经验的基础上,不需要了解被控对象的精确数学模型,对于非线性、复杂对象的控制显示了良好的精度和鲁棒性^[4-6]。自适应模糊 PID 控制器是模糊辨识系统和模糊控制算法的

收稿日期:2016-10-17

作者简介:黄平(1989-),女,安徽阜阳人,硕士研究生,主要从事全向式下肢康复机器人控制系统方面的研究。E-mail:hp121031@163.com

通信联系人:江先志,男,讲师。E-mail:xianzhi@zstu.edu.cn

结合,根据动、静态特性控制器在线识别控制效果,对 PID 参数进行自修正,从而改善控制效果。

本研究将采用 stm32 芯片作为主控芯片,利用自适应模糊 PID 控制算法实现直流电机的高精度调速。

1 直流电机速度控制系统

直流电机调速系统硬件结构由 MCU、直流电机、编码器、USB 转 TTL 等模块构成。软件部分分别采用传统 PID 控制和模糊 PID 控制算法优化电机调速控制系统。电机调速控制系统框图如图 1 所示。

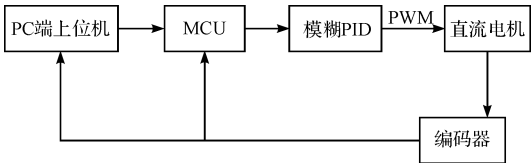


图 1 调速系统框图

在实验中,直流电机控制系统采用的是带编码器的直流减速电机,编码器将电机的转动转换成两列相位差为 90°的脉冲序列,并提供给主控芯片进行采样,主控芯片通过获取编码器信号计算电机的运行速度和方向,并把计算结果作为模糊 PID 控制器的反馈信号,

主控芯片利用模糊 PID 控制器计算的结果,输出 PWM 信号以实现对电机的控制。

2 硬件电路设计

2.1 驱动电路

IRS21867S 是一种高电压,高速功率 MOSFET 和 IGBT 驱动器,带有独立的高、低侧参考输出通道。输出驱动器具有高脉冲电流缓冲级,最小驱动器跨导。浮置沟道可以用于驱动一个 N 沟道功率 MOSFET 或 IGBT 在其中工作频率高达 600 V 高侧配置。综合考虑功率管的开启电压、最大漏极电流、漏源击穿电压、功耗等因素,驱动电路选用 IRS21867S 电桥驱动器驱动 H 桥上的 MOSFET。

驱动电路原理图如图 2 所示。

IRS21867S 的 HIN 口接主控芯片 PWM 输入,LIN 口接普通 IO。当控制器输出结果为正时,主控芯片引脚 PA9 输出 PWM,PA8 输出低电平,PA10 输出高电平,U2 导通电流流向为 U2→电机→U7。当控制器输出结果为负时,P11 输出 PWM,PA8 输出为高电平,PA10 输出低电平,U6 导通电流流向为 U6→电机→U3。

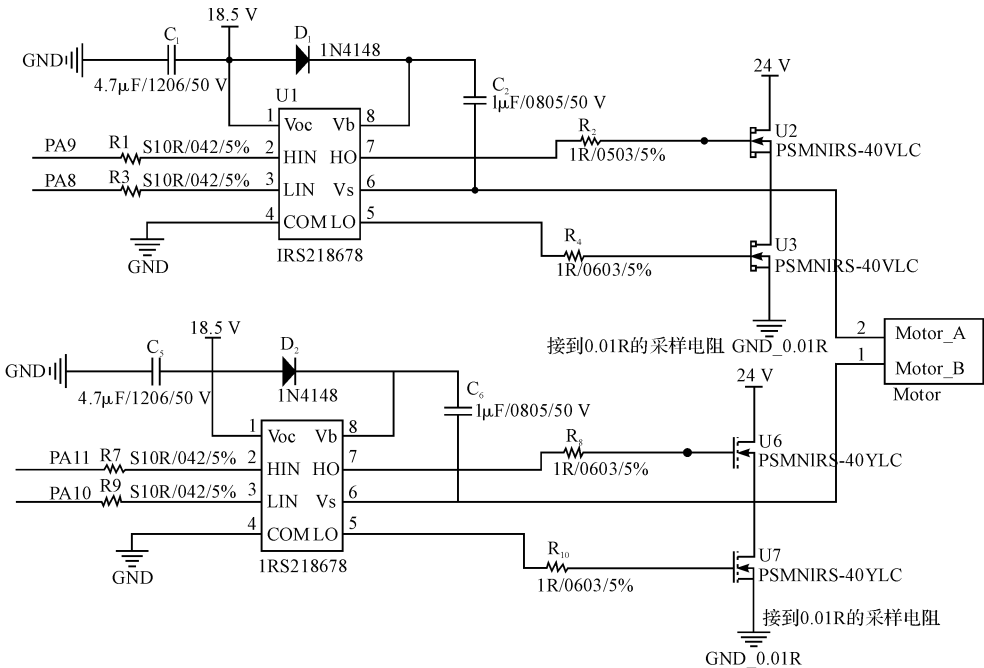


图 2 驱动电路

2.2 主控电路

主控电路主要是负责接收控制指令和产生响应控制信号,并通过串口通信向上位机发送电机运行过程中的相关信号。为保证电路工作的可靠性,控制电路应具有较高的运行速度和稳定性能,高性能

比和易于开发对于设计电路来说也是重要考虑因素。STM32 系列芯片基于专为要求高性能、低成本、低功耗的嵌入式应用专门设计的 ARMCortex M3 内核,选用 STM32F103C8T6 作为主控芯片,能够满足实验对控制电路的要求。STM32F103C8T6

基于 ARM® 的 32 位微控制器,具有 64 KB 的闪存程序存储器。芯片供电电压为 2.0 V ~ 3.6 V,就能

完成上电或断电复位功能。主控电路设计图如图 3 所示。

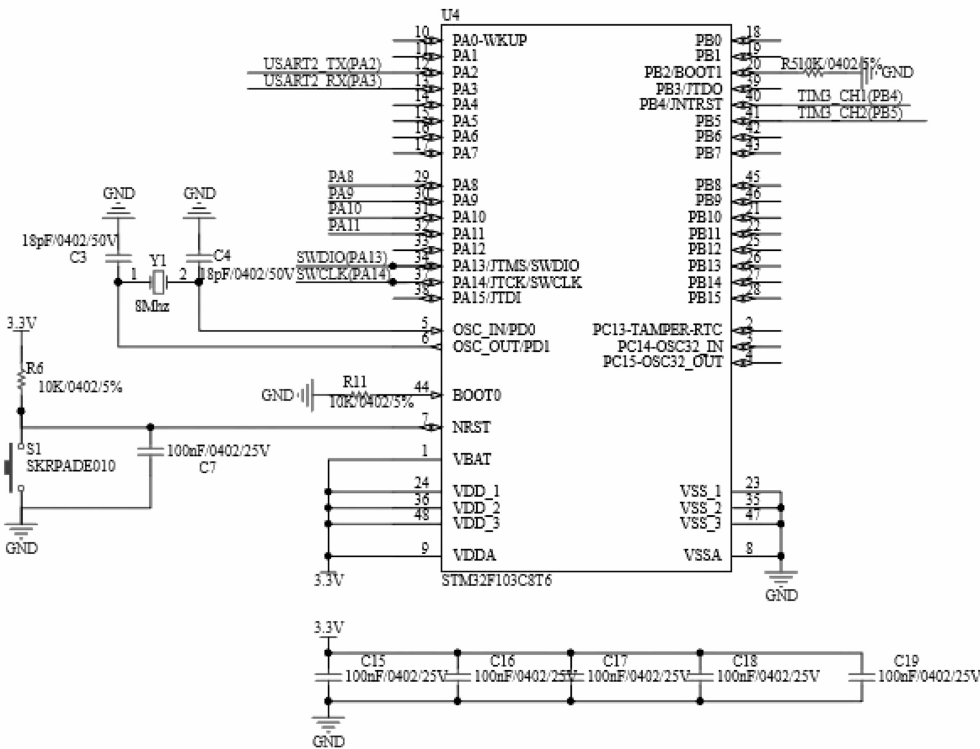


图 3 主控电路

3 模糊 PID 控制

常规 PID 控制器在 PID 参数整定完成后在整个控制过程中就是固定不变的。但在实际应用中,由于许多被控过程往往具有非线性、时变性,加之负载扰动和外部干扰等原因,就需要系统模型或过程参数随工作环境和时间变化而变化。为此本研究在常规 PID 控制的基础上结合模糊控制算法,实现电机运行过程中 PID 参数在线调整,以使控制器对过程的控制一直处于最优状态。

3.1 传统 PID 控制简介

(1) 控制器基本原理。PID 控制器就是根据系统的误差,利用系统误差的比例、积分、微分值计算出控制量对系统进行控制。PID 控制器原理图如图 4 所示。

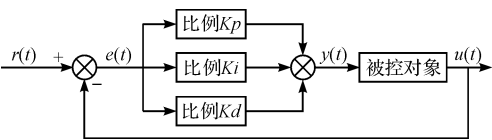


图 4 PID 原理图

$r(t)$ —控制系统的输入量; $y(t)$ —系统输出量; $e(t)$ —系统输入量与输出量的差值

$e(t)$ 可表示为:

$$e(t) = r(t) - y(t) \tag{1}$$

$e(t)$ 作为 PID 控制器的输入量,经过 PID 控制器输出 $u(t)$,以控制被控对象实现控制系统的优化。控制器的计算数学表达式如下:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \tag{2}$$

式中: K_p —控制器的比例系数; K_p/T_i —积分环节参数, T_i 是积分时间; $K_p * T_d$ —微分环节参数, T_d 是微分时间。

(2) 数字式 PID 控制算法。随着计算机和微控制器的出现,PID 控制算法开始应用于微控制器,用于实现过程控制的智能化。根据微控制器的控制机理,需要对图 4 所示的控制过程进行离散化,以便在微控制器中实现 PID 控制。位置式 PID 离散式如下:

$$u_k = K_p \left[e_k + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e_j + \frac{T_d (e_k - e_{k-1})}{T} \right] \tag{3}$$

其中: k —采样标号, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$; u_k —第 k 次采样完成后系统的输出值; e_k —第 k 次采样输入量与输出量的偏差值; T —采样周期, T 越小,离散过程将越趋近连续过程。

(3) PID 参数整定方法。在 PID 控制中,整定 PID

参数无疑是系统控制好坏的关键。在实际应用中,一般是结合前人的经验和实验数据,通过试凑法来确定PID的参数。比例调节部分是用来调节系统的响应速度的,增大 K_p ,系统响应增加,静差减小,然而过大的 K_p 会使系统产生较大超调,系统产生震荡,系统稳定性变坏。而积分调节的作用是消除系统的稳态误差,在控制过程中,积分环节针对偏差信号不断调整积分输出,以使系统的稳态误差值趋于零^[7]。 K_i 越大,系统稳态误差消除越快,但过大的 K_i 会使系统产生较大的超调。微分环节能够预测偏差的变化,具有超前的控制特性。 K_d 增大可提高系统的响应速度和稳定性,但系统对抗扰动的抑制能力减弱。

在整定PID参数过程中,笔者参考上述3个参数对控制系统的影响趋势,对参数调整顺序依次是比例、积分、微分参数。笔者首先逐次增加比例参数 K_p ,观察系统的响应曲线,直至得到反应较快,超调较小的曲线,然后再逐渐增大积分参数 K_i ,并减小 K_p ,并观察系统响应曲线,使系统保持较好的动态性能,最后再逐渐增加 K_d ,并根据相关经验反复试凑PID 3个参数,直至得到满意的调节效果。

3.2 直流电机模糊PID控制系统

模糊PID控制器以电机目标速度与编码器反馈的实际速度之间的偏差值 e 和偏差值变化率 ec 作为输入,利用模糊理论在线对PID参数进行校正,构成自整定模糊PID控制器满足不同时刻不同状态下偏差 e 和偏差变化率 ec 对PID参数自整定的要求。

3.3 模糊PID控制器设计

模糊控制器以专家经验和人工控制规则为基础组织模糊决策表,然后通过查询决策表确定控制量的大小,具有控制灵活和适应性强的优点^[8-9]。模糊PID控制就是找出PID 3个参数 K_p 、 K_i 、 K_d 与误差 e 和误差变化率 ec 之间的模糊关系。在实际运行中不断检测 e 和 ec ,根据模糊控制规则来对PID的3个参数进行在线修改,以满足在不同 e 和 ec 时控制系统对控制参数的不同要求,从而使被控对象有良好的动、静态性能^[10-11]。模糊PID控制器结构如图5所示。

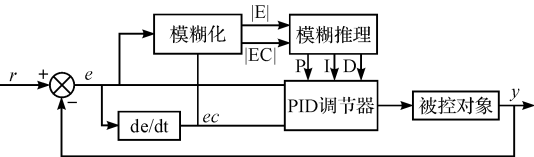


图5 模糊PID控制器结构

模糊PID参数调整算式如下^[12]：

$$K_p = K_p' + fuzzy_K_p(E_i, EC_i) * K1 \tag{4}$$

式中： K_p —PID比例环节控制参数， K_p' —其控制参数的初始参数， $fuzzy_K_p(E_i, EC_i)$ —偏差 E_i 和偏差变化率 EC_i 模糊计算函数， $K1$ —PID参数 K_p 的比例因子。 K_i 、 K_d 算式与上 K_p 相似，就不再赘述。

(1) 输入量和输出量。根据实验数据和实际需要，控制系统中 e 和 ec 的模糊论域都可取 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ ，偏差和偏差变化率的模糊语言变量设定为：负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)。即E和EC的模糊集为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。在此系统中，系统输入值并不直接等于模糊控制变量论域中的值，引入一个模糊量化因子来对系统输入值进行转换，假设系统的 e 和 ec 取值范围为 $[-e, e]$ ， $[-ec, ec]$ ；模糊论域为 $[-n, n]$ ， $[-N, N]$ ，模糊量化因子定义如下式：

$$Ke = \frac{n}{e} \tag{5}$$

$$Kec = \frac{N}{ec} \tag{6}$$

与输入量化因子相对，比例因子就是将模糊控制变量论域的值转化为模糊控制系统输出的精确值。假设模糊控制系统的论域输出值为 $[-a, a]$ ，其比例因子可定义为：

$$Ka = \frac{a}{N} \tag{7}$$

根据本研究的系统特性,此处取 $Ke = 0.1$, $Kec = 0.2$,输出量 K_p 的比例因子 $K1 = 0.5$, K_i 的比例因子 $K2 = 0.03$, K_d 的比例因子 $K3 = 0.005$ 。设定PID的3个输出参数的模糊集均为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$,综合输入和输出隶属度函数都选用对称分布三角形隶属度函数。

(2) 参数自整定规则。该实验根据 K_p 、 K_i 、 K_d 参数对系统输出特性的影响情况,总结PID参数字整定理论知识和实际经验建立 K_p 、 K_i 、 K_d 的模糊规则表。三者的模糊控制规则如表(1~3)所示。

表1 ΔKp模糊控制规则表

EC	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
NM	NM	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
NS	NS	PS	PS	PM	PM	PB	PB
ZO	NS	PS	PS	PM	PM	PB	PB
PS	ZO	PS	PS	PM	PM	PB	PB
PM	PS	PS	PS	PB	PB	PB	PB
PB	PM	PS	PM	PB	PB	PB	PB

表 2 ΔKi 模糊控制规则表

EC	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NM	NS	PS	ZO	ZO	PM	PM
NM	NS	NS	PS	PS	PS	PM	PB
NS	NB	ZO	PM	PS	PS	PB	PB
ZO	NM	PS	PM	PS	PS	PB	PB
PS	NM	PS	PM	ZO	PS	PB	PB
PM	NS	PM	PM	PS	PS	PB	PB
PB	ZO	PM	PM	PS	PS	PB	PB

表 3 ΔKd 模糊控制规则表

EC	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PM	PS	PS	PS	NB	NB
NM	PM	PS	PS	PM	PS	NB	NB
NS	PM	PS	PS	PM	ZO	NM	NM
ZO	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	NM	NS
PS	ZO	ZO	ZO	PS	ZO	NM	PS
PM	ZO	NS	ZO	NS	PS	PS	PM
PB	ZO	NS	PS	NS	PS	PM	PB

(3)输出参数解模糊化。模糊控制系统最终输给执行机构的是一个精确量,因此需要把模糊量转化为精确量,这就需要解模糊算法,解模糊算法通常包括最大隶属度法,中位数法以及加权平均法等^[13]。本研究选用加权平均法对模糊 PID 控制器的输出进行解模糊,加权平均法是先计算输出量模糊集中的各元素与其隶属度的乘积,再计算此乘积的和对于输出量模糊集的隶属度之和的平均值。计算表达式如下:

$$\text{fuzzy_}K_p(E_i, EC_i) = \frac{\sum_{i=1}^4 u_i[(|E|, |EC|) * K_{pi}]}{\sum_{i=1}^4 u_i(|E|, |EC|)}$$

(8)

式中: $u_i(|E|, |EC|) = \min((u_i(|E|), u_i(|EC|)))$, $u_i(|E|)$ —偏差 e 的隶属度函数; K_{pi} —参数 Kp 不同状态下的加权,可根据相关模糊规则表查询其值进行解模糊化。

自整定 PID 参数 K_p, K_i, K_d 的输出精确值可根据式(4)计算得出。

4 系统软件设计

系统的软件部分主要由主程序和中断服务程序构成。主程序主要是定义系统变量,初始化系统的各个子模块并进行系统过流检测。系统的子模块初始化之后进入死循环,循环中通过中断程序控制 PWM 的占

空比,来实现直流电机参数自适应 PID 的调速控制。并通过串口中断不断向上位机发送速度值,以便上位机软件绘制速度响应曲线。

程序流程控制如图 6 所示。

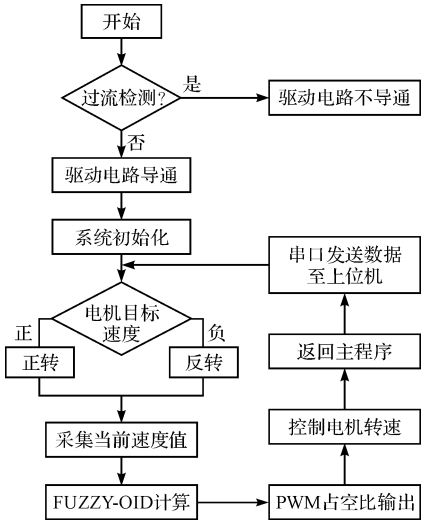


图 6 系统软件流程图

5 实验结果

电机响应曲线是上位机根据编码器输出信号绘制的响应曲线,横坐标为采样次数,纵坐标为转速。实验中不同控制方法速度响应曲线如图 7 所示。图中横线为目标速度,曲线为编码器反馈速度。Stm32 采样周期为 1 ms。

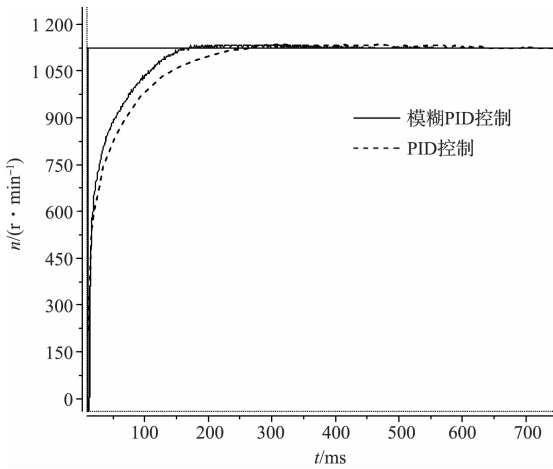


图 7 实验中不同控制方法速度响应曲线

实验实物图如图 8 所示。

根据电机响应曲线可以明显观察到对比常规 PID 控制器,模糊 PID 控制器响应更加迅速,超调减小,系统稳定性和控制精度都明显提高。该实验结果说明本研究设计的直流电机系统能够实现快速响应,并具有较强的鲁棒性。

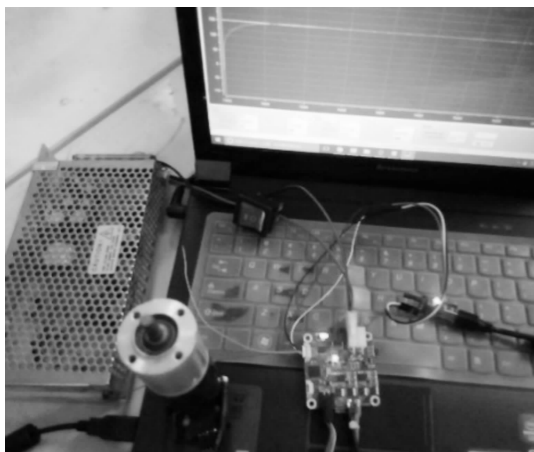


图8 实验实物图

6 结束语

本研究设计的一种基于模糊PID控制器的直流电机调速系统,采用芯片stm32f103c8T6控制系统的输入输出,基于输入参数的变化,采用模糊原理对PID参数进行在线自调整。

实验输出结果表明,模糊PID控制器相比传统PID,能够提高直流电机调速系统的响应速度,抑制超调,提高控制精度,增强系统的鲁棒性和动、静态稳定性。随着电子工业的迅速发展,电子行业对控制系统的精度和稳定性要求越来越高,智能控制算法不断推陈出新,许多改进的模糊控制算法在控制算法中占据重要地位。

模糊PID控制算法作为一种改进的模糊控制算法,能够改善单纯的模糊控制器动、静态性能,应用日益广泛。

参考文献(References):

- [1] 肖金凤,盛义发,徐祖华,等. 模糊-PID 混合控制直流电机调速系统设计[J]. 微电机,2011,44(5):56-59.
- [2] LI W W, XU D G, ZHANG W. Research on wind turbine emulation based on DC motor[J]. *Acta Energine Solaris Sinica*,2007,28(11):2589-2593
- [3] 夏铭梓. 无刷直流电机控制系统的智能算法研究[D]. 武汉:华中科技大学自动化学院,2013.
- [4] 李军红,李兰君,杨武娇. 无刷直流电机调速系统神经网络自适应滑模变结构控制[J]. 微计算机信息,2010(2):68-70.
- [5] 李国勇. 智能控制及其 MATLAB 实现[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [6] 朱里红,王定文. 基于模糊PID的电磁循迹小车控制系统[J]. 兵工自动化,2016,35(2):44-47.
- [7] 潘晓磊,赵川,吕海立. 无刷直流电机模糊自适应PID控制的研究[J]. 机电工程技术,2016,45(3):85-89.
- [8] 夏长亮,郭培健,史婷娜,等. 基于模糊遗传算法的无刷直流电机自适应控制[J]. 中国电机工程学报,2005,25(11):129-133.
- [9] SAVRAN A, KAHRAMAN G. A fuzzy model based adaptive PID controller design for nonlinear and uncertain processes[J]. *Isa Transactions*,2014,53(2):280-288.
- [10] 桑勇,代月帮. 基于STM32的交替式排水量检测系统的硬件设计[J]. 液压气动与密封,2016(3):7-11.
- [11] 王葳,张永科,刘鹏鹏,等. 无刷直流电机模糊PID控制系统研究与仿真[J]. 计算机仿真,2012(4):196-199.
- [12] 陈玉枫. 新型免疫克隆算法在永磁无刷直流电机系统中的应用[J]. 轻工机械,2015,33(3):62-65.
- [13] 曾光奇,胡均安,王东,等. 模糊控制理论与工程应用[M]. 武汉:华中科大出版社,2006.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

黄平,王英,江先志. 基于STM32的直流电机模糊PID调速系统研究[J]. 机电工程,2017,34(4):380-385.

HUANG Ping, WANG Ying, JIANG Xian-zhi. DC motor fuzzy-PID control system based on STM32[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(4):380-385.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>